

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6810.2016.8).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Особенности двухфазного течения в прямоугольном микроканале // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – № 10. – С. 52-58.
2. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – С. 17-22.
3. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. Особенности испарения капель воды на нагреваемой поверхности // Доклады академии наук. – 2013. – Т. 448. – № 3. – С. 293.
4. Kuznetsov G.V., Zakharevich A.V., Bel'kov N.S. Effect of heat-transfer conditions on the ignition characteristics of liquid fuel // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 50. – PP. 424-429.
5. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of radiative heat and mass transfer mechanism in system water droplet - high-temperature gases on integral characteristics of liquid evaporation // Thermal Science. – 2015. – V. 19. – PP. 1541–1552.
6. Lyulin Y., Kabov O. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress gas flow // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 70. – PP. 599-609.
7. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капли воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78. – №3. – С. 335-339.
8. Thomas N., Ferguson A. Evaporation from a Circular Water Surface // Philos. Mag. – 1917. – V.34. – PP. 309–321.
9. Velicanov V.D., Orlova E.G., Saigash A.S., Korneva O.S. Experimental observation of the temperature at the liquid/gas interface // MATEC Web of Conference. – 2016. – V. 72. – 01028.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТНОГО ОСНОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

О.В. Степанова, В.И. Максимов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ61

#### **Введение**

Хранилища сжиженного природного газа имеют различную конструкцию, форму и размеры. Для экономичного и безопасного хранения сжиженного

газа производится исследование теплового состояния фундаментного основания резервуара [1].

**Цель работы:**

Математическое моделирование теплового состояния фундаментного основания наземного низкотемпературного резервуара для хранения сниженного природного газа.

Рассматривается низкотемпературный наземный резервуар для хранения СПГ, имеющий плитный фундамент (Рисунок 1)[1].

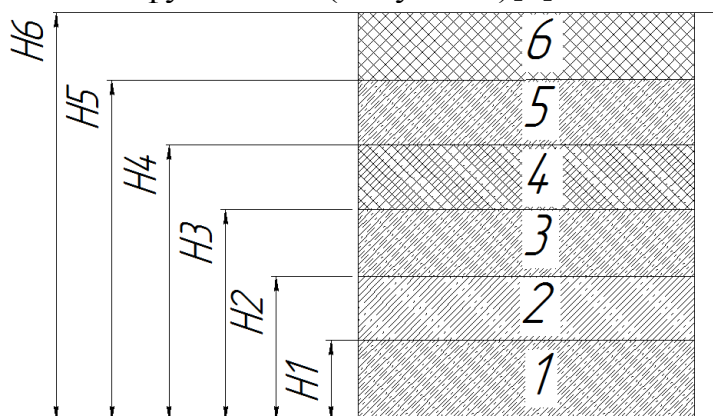


Рис. 1. Фундаментное основание низкотемпературного резервуара для хранения СПГ бетонные сваи, 2- слой с теплообменниками, 3- опорный фундамент, 4- амортизирующие прокладки, 5- наружная оболочка, 6- блоки пеностекла.

Фундаментное основание разделено на равные части, рассматривается одна из частей, длина и высота  $H=L=1$  м. Правая и левая граница области решения (Рисунок 2) теплоизолированные. На верхней границе отвод тепла  $q_2=-20$ , Вт/м<sup>2</sup>, на нижней границе подвод тепла  $q_1=0,0005$ , Вт/м<sup>2</sup>. Подвод тепла производится за счет теплоты грунта. Отвод тепла осуществляется за счет соприкосновения фундаментного основания с низкотемпературным резервуаром. Начальная температура принимается равной температуре грунта  $T_0=5$ , °С. Имеется внутренний источник тепла во втором слое за счет теплообменника (подогревателя фундамента)  $q_3=0,0004$ , Вт/м<sup>3</sup>.

Физические условия определяют теплофизические характеристики тела [2]: коэффициент теплопроводности  $\lambda_{1-6}$ , плотность  $\rho_{1-6}$ , удельная теплоемкость  $c_{1-6}$  приведены в таблице 1.

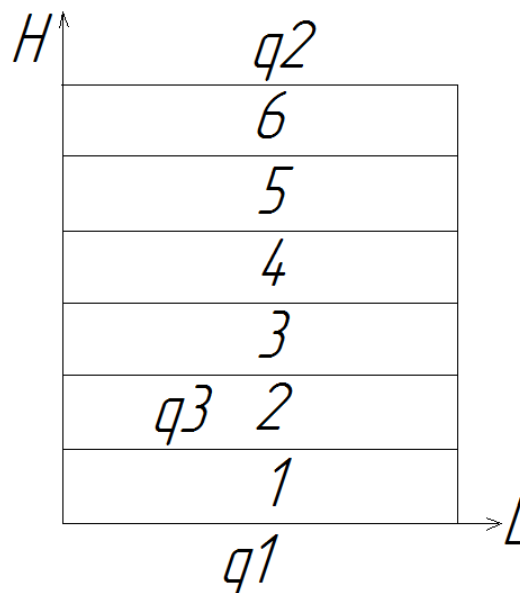


Рис. 2. Область решения.

Табл. 1. Теплофизические характеристики материала

№	Элемент конструкции	Материал	$\lambda$ , Вт/м <sup>0</sup> С;	$c$ , кДж/кг <sup>0</sup> С;	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Сваи	Бетон (особо тяжелый/легкий)	1,3	0,88	2800/800
2	Теплообменник	Бетон	1,3	0,88	2000
3	Опорный фундамент	Бетон	1,3	0,88	2000
4	Амортизирующие прокладки	Жесткий пенистый полистирол	0,12	1,11	1050
5	Наружная оболочка	Бетон	1,3	0,88	2000
6	Блоки пеностекла	пеностекло	0,14	1	500

### Математическая постановка задачи

Решается одномерная нестационарная задача теплопроводности (1) в фундаменте резервуара, представляющего собой 6 неоднородностей с разными теплофизическими свойствами и подводом тепла в одном из слоев[3].

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) + q_3, |0 < x < L, 0 < y < H_i| \quad (1)$$

### Начальные и граничные условия

$$t = 0, T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H;$$

$$x = 0: -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0;$$

$$x = L: -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0;$$

$$y = 0: \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} = q_1, t > 0;$$

$$y = H: \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} = q_2, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_i(x_i, y_i, t) = T_j(x_j, y_j, t); \\ -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = -\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} \end{cases}, \text{ пр } | y = H_i, 0 < x < L. \quad (2)$$

Сформулированное уравнение (1) с соответствующими краевыми условиями (2) решается с помощью метода конечных разностей, используя неявную четырехточечную схему [4]. Результаты получены для стационарного режима с конечным временем 6 часов.

Установлено влияние теплофизических свойств материалов на тепловое состояние фундаментного основания низкотемпературного резервуара для хранения СПГ при замене тяжелого бетона на легкий (Рисунок 3-4).

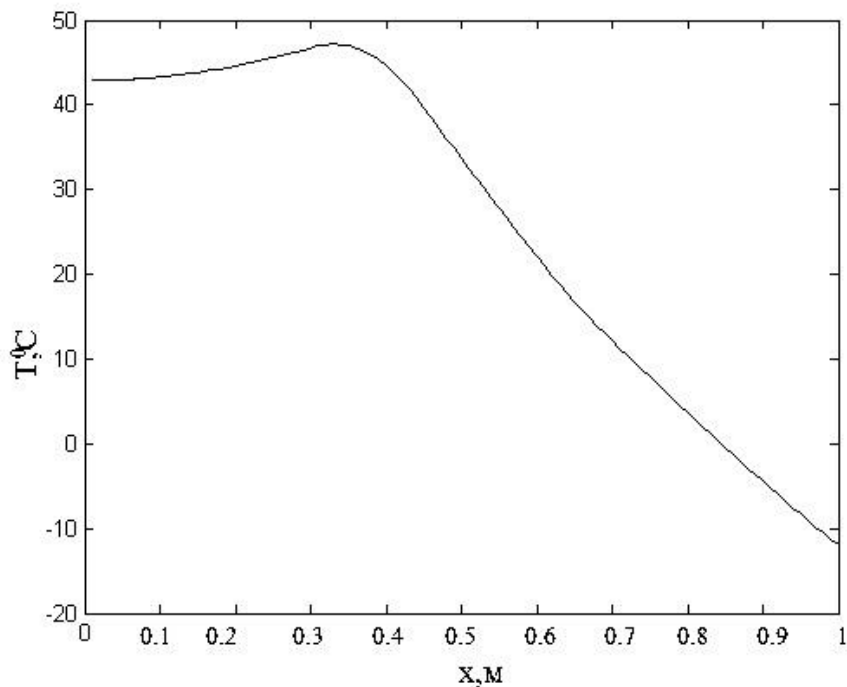


Рис. 3. Распределение температуры по высоте при использовании тяжелого бетона для конструкции свай.

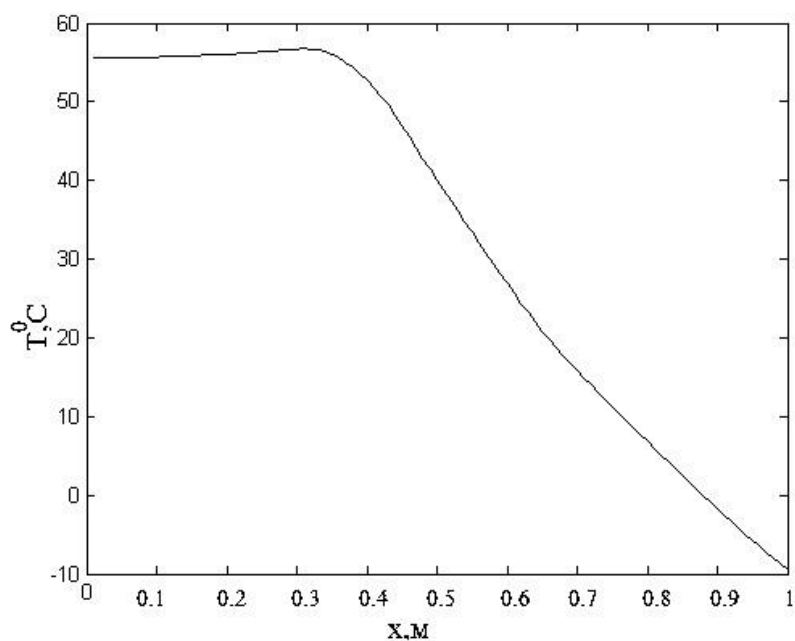


Рис. 4. Распределение температуры по высоте при использовании легкого бетона для конструкции свай.

### Вывод

Проведено численное моделирование теплового состояния фундаментного основания резервуара для сжиженного природного газа.

Выявлено что, при замене в конструкции фундамента тяжелого бетона на легкий бетон, происходит увеличение промерзания основания на 65 %.

Необходимая тепловая мощность подогревателя для исключения промерзания такой конструкции уменьшается на 30%.

Полученные результаты численного моделирования теплового состояния многослойного фундаментного основания можно использовать при проектировании и эксплуатации новых и уже существующих низкотемпературных наземных резервуаров для хранения сжиженного природного газа.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы.- М.: Изд-во «Нефть и Газ», 2009. - 640 с.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача.-М.: Изд-во «Энергия», 1975.-487 с.
3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: Учебное пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2007-172с.
4. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.

Научный руководитель: В.И. Максимов, к.т.н, доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.